

# Estimation of the Energy Saving Potentials in Foundry Industries Based on ISO 50001

J. D. Chaves, M. I. Gallego, F. González, D. A. Aguilar, J. R. Vidal, E. C. Quispe, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—This paper presents the application of tools to develop a procedure to estimate the energy saving potentials in a small foundry company in Colombia, based on the ISO 50001 standard. This work was carried within the framework of a national industrial project, funded by UNIDO, aimed at the small and medium industrial sector companies (SMEs) of Valle del Cauca, to establish the requirements that are needed to implement an energy management system. With the aim of increasing the energy efficiency of the processes, the energy planning process proposed by ISO 50001 is carried out, whose lead to the establishment of concrete and attainable goals, as well as to the proposal of various improvement plans regarding savings and efficient use of energy. As a result, the savings potentials for the different production levels were estimated, which represents a saving of 15984.25 kWh, which corresponds to 8.7% of the total energy consumed in the 10 months analyzed, and a value of 1486 USD.

**Index Terms** — Energy efficiency, Energy management, Foundry industry, ISO 50001, Energy planning.

## I. INTRODUCTION

Actualmente la industria consume el 31% de toda la energía generada en el mundo, además, cerca del 67% de la electricidad es generada a partir de combustibles fósiles. Este panorama coloca, directa o indirectamente, al sector industrial como uno de los más contaminantes del medio ambiente, pero a su vez, lo relaciona con altos potenciales de ahorro energético y de emisiones, pues para un escenario de desarrollo sostenible al año 2050, la aplicación de la eficiencia energética puede reducir en 37% las emisiones de CO<sub>2</sub> [1], [2].

En los últimos años la eficiencia energética ha sido un tema de gran interés para las empresas, debido a la necesidad de reducir costos de producción y aumentar su competitividad, así mismo porque trae un impacto positivo para el medio ambiente al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [3]–[6]. El desempeño energético de los procesos industriales puede ser incrementado a través de medidas de cambio tecnológico y/o la implementación de un sistema de gestión energética. Así, el gran impacto de los sistemas de gestión energética en el

incremento de la eficiencia energética y en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, llevo al desarrollo de la norma ISO 50001 con el apoyo de la ONUDI [7]. La primera versión de la norma ISO 50001: Sistemas de gestión de la energía, se expidió el año 2011 y la segunda versión el año 2018 [8].

Recientemente en Colombia se han desarrollado proyectos de participación universidad-estado-empresa, donde se han implementado medidas de eficiencia energética que responden a las necesidades particulares de la industria en un marco de mejora continua e innovación [9]. En este contexto, el año 2018 se realizó en Colombia el Programa de Evaluación Energética Industrial PEVI, financiado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), donde se buscó fomentar el uso eficiente de recursos energéticos bajo los lineamientos de la norma ISO 50001 para pequeñas y medianas empresas industriales.

Las industrias de fundición de metales son industrias representativas de cada país, sin embargo existen pocas referencias bibliográficas sobre la aplicación de la eficiencia energética y la norma ISO 50001 a este tipo de industrias. Al respecto en el trabajo de Thollander et al. [10], se menciona que en promedio, el potencial de ahorro de energía en la industria europea de fundición es del 7,5% y que un hay gran potencial de mejora lo que requiere futuras investigaciones y acciones políticas en el campo. Asimismo Trianni et al. [11] y Prashar [12] mencionan que la eficiencia energética es un elemento importante del desarrollo sostenible de pequeñas y medianas empresas. Lo anterior muestra que el incremento del desempeño energético en la empresas de fundición es un tema de gran interés y actualidad.

La novedad de este trabajo es que presenta la aplicación de herramientas de gestión energética para implementar la etapa de Planificación Energética en una compañía de fundición de metales y finalmente evaluar el potencial de ahorro energético siguiendo la metodología de la norma ISO 50001:2018 [8]. La empresa donde se implementó este procedimiento, participó en el PEVI, y está ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia.

Este trabajo presenta la aplicación de herramientas de gestión energética en la implementación del proceso de Planificación Energética, siguiendo la metodología de la norma ISO 50001, para una empresa de fundición de metal, paso a paso, desde la caracterización de los usos pasados y presentes de la energía hasta la evaluación del desempeño energético y el ahorro potencial de energía. Finalmente se establecen las medidas de operación, mantenimiento y de cambio tecnológico, estableciéndose el nivel táctico de la etapa de planeación energética en base a la norma ISO 50001:2018.

J. D. Chaves, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia (e-mail: [juan\\_diego.chaves@uao.edu.co](mailto:juan_diego.chaves@uao.edu.co))

M. I. Gallego, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia (e-mail: [maria.gallego@uao.edu.co](mailto:maria.gallego@uao.edu.co))

F. González, GIEN, Dpto. de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia (e-mail: [fgonzalezr@uao.edu.co](mailto:fgonzalezr@uao.edu.co))

D. Aguilar, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia (e-mail: [daguilar\\_0430@hotmail.com](mailto:daguilar_0430@hotmail.com))

J. R. Vidal, GIEN, Dpto. de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia (e-mail: [jrvidal@uao.edu.co](mailto:jrvidal@uao.edu.co))

E. C. Quispe, GIEN, Dpto. de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia (e-mail: [ecquispe@uao.edu.co](mailto:ecquispe@uao.edu.co))

Corresponding author: J. R. Vidal

## II. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La empresa en cuestión se dedica a la fundición y mecanizado de piezas para maquinaria industrial. Estas piezas pueden ser fabricadas tanto en materiales ferrosos como no ferrosos. En cuanto al proceso productivo, este puede ser dividido en tres macro etapas, la primera es la recepción y almacenamiento del material, la segunda etapa es la fundición y moldeo, y la tercera es el mecanizado y puesta a punto de las piezas finales. Esto se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Diagrama de proceso productivo

En la primera etapa, la materia prima proveniente de una comercializadora de chatarra externa, es pesada, separada y clasificada para posteriormente ser almacenada. En el área de fundición, se cuenta con seis hornos, tres son de inducción eléctrica, de los cuales dos son para materiales ferrosos con capacidad para 700 y 350 kg, y uno es específicamente para bronce con capacidad para 650 kg. Los otros tres son hornos de piso, en los cuales se trabaja únicamente materiales no ferrosos. Cuando las piezas están formadas son pasadas al área de pulido, finalizando así la segunda etapa del proceso. Finalmente, en la tercera etapa se dan las dimensiones especificadas y el acabado final requerido.

## III. METODOLOGÍA

El trabajo se inició definiendo los compromisos de los ejecutores del proyecto y las responsabilidades de la alta dirección, nombrándose un representante de la alta dirección para interactuar con el equipo ejecutor.

Siendo la Planificación Energética la base para la implementación de un sistema de gestión de energía (SGEn) según la ISO 50001:2018, este trabajo sigue la metodología que se muestra en la Fig. 2. Se debe aclarar que en este trabajo se abordará el componente táctico de la planeación energética.

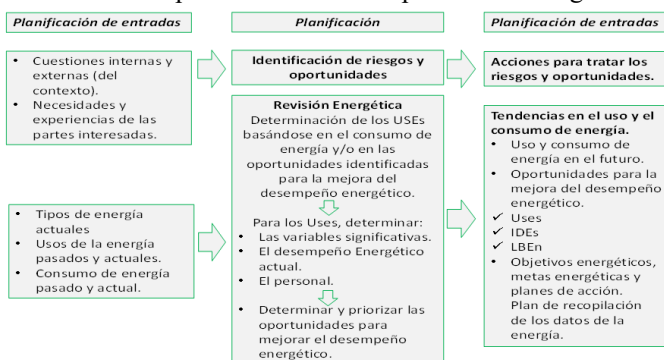


Fig. 2. Planificación Energética [8]

En la implementación de la metodología propuesta por la norma para la etapa de la Planificación energética se siguieron los siguientes pasos: en primer lugar se caracterizan los usos de pasados y presentes de la energía, y se construye el diagrama energético productivo de la empresa, luego se realizan las actividades previstas en la Revisión Energética, donde se determinan los usos significativos de energía (USE) y las oportunidades de mejora del desempeño energético, a continuación se establecen indicadores de gestión y se evalúa el desempeño energético y el ahorro potencial de energía. Finalmente se establecen las medidas de operación, mantenimiento y de cambio tecnológico para el incremento del desempeño energético.

En el proceso de implementar la metodología se ha utilizado varias herramientas de gestión energética desarrolladas en estudios anteriores [7, 13-15]. Las herramientas usadas en este trabajo son:

- Diagrama energético productivo, permite conocer cómo se realizan los procesos de servicios energéticos y productivos de la empresa, el tipo de energía que se consume en cada proceso, y los equipos asociados a los consumos mayores de energía de cada proceso.
- Diagrama de Sankey, permite conocer a nivel global la relación entre los energéticos primarios y los energéticos secundarios que se utilizan en la empresa, los procesos, líneas de producción o equipos donde se usan los energéticos primarios y secundarios de la empresa y si existen residuos energéticos importantes no utilizados.
- Diagrama de Pareto, permite identificar los Usos Significativos de Energía (USEn). El 20% de las líneas de producción, procesos productivos o equipos que consumen el 80% de la energía.
- Diagrama Energía-Producción vs Tiempo, permite identificar comportamientos atípicos de consumo de energía en función de la producción.
- Gráfico de Control Energía, permite definir puntos típicos y fuera de control en el proceso productivo.
- Línea de base Energética LBEn, establece la referencia cuantitativa que proporciona la base para la comparación del desempeño energético.
- Índice de Consumo, relaciona el consumo con la intensidad de la producción.
- CUSUM, permite comparar el desempeño energético con el periodo base.

## IV. RESULTADOS

El levantamiento de la información y análisis se realizó de forma conjunta entre personal de la empresa y el grupo ejecutor. Luego de aplicar la metodología, a continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las herramientas de gestión en cada paso del proceso.

### A. Resultados del Análisis de los tipos de Energía y su Uso

Para identificar los usos históricos de energía se realizó el levantamiento de datos y los registros, tanto de producción como de consumo, y con base a éstos se estableció el diagrama energético productivo de la compañía mostrado en la Fig. 3,

donde se presenta el consumo representativo por áreas en toneladas equivalentes de petróleo de las áreas asociadas al proceso productivo.

### B. Resultados del Proceso de Revisión Energética

De las figuras anteriores se evidencia que los esfuerzos se deben concentrar en la energía eléctrica y, dentro de este

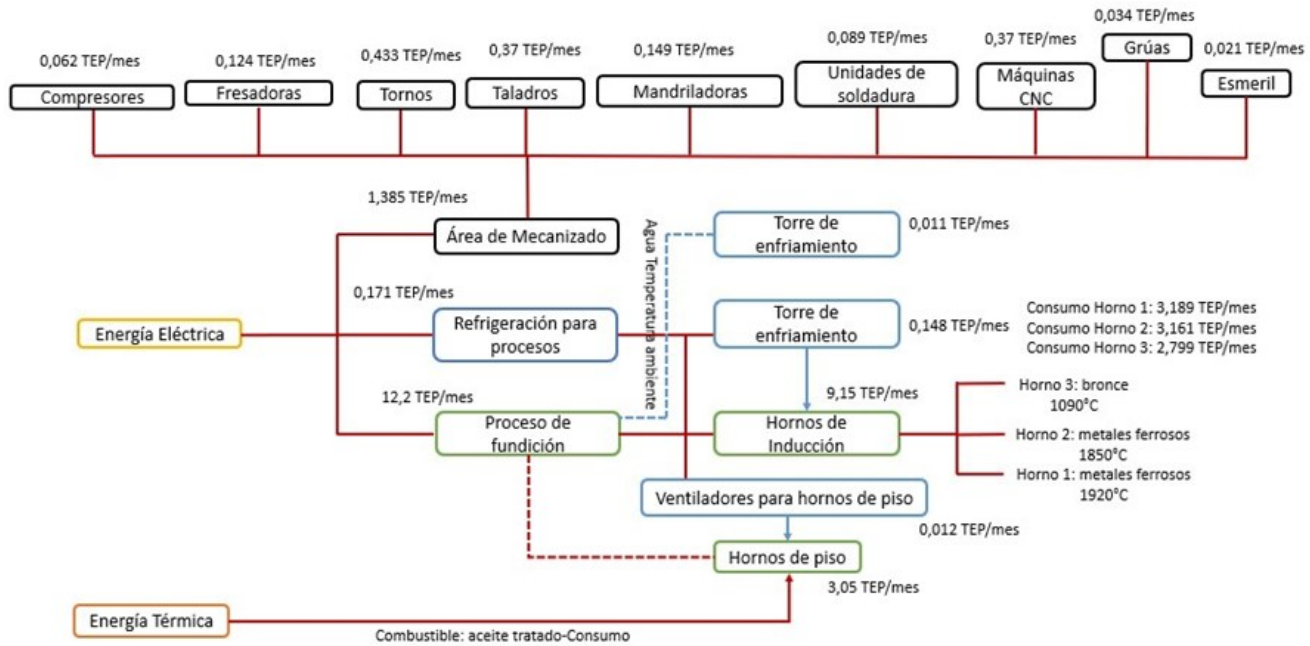


Fig. 3. Diagrama energético productivo

Actualmente la empresa cuenta con dos portadores energéticos. La energía eléctrica; utilizada en un sistema compuesto por dos transformadores que distribuyen la energía a los procesos de producción más importantes de la compañía y al área administrativa, y la energía térmica proveniente de un combustible derivado del petróleo, que es empleada para el funcionamiento de tres hornos de piso del área de fundición.

Por lo tanto, para poder obtener la matriz energética de ambos portadores, se hizo el equivalente energético a toneladas de combustible convencional (de petróleo), de lo cual se determinó que aproximadamente el 77% de la energía está asociada al componente eléctrico y el resto está asociado con la energía térmica. En la Fig. 4 se presenta información más detallada de los consumos de energía.

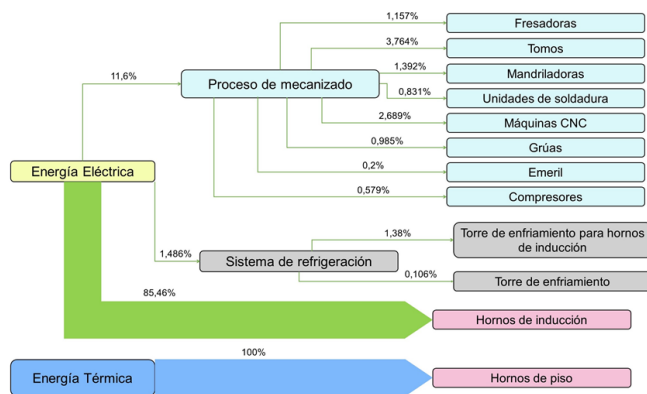


Fig. 4. Diagrama de Sankey de los fluidos energéticos. Adaptado de [16]

energético, seleccionar los equipos de mayor consumo. En la Fig. 5 muestra el diagrama de Pareto del consumo de la energía eléctrica.

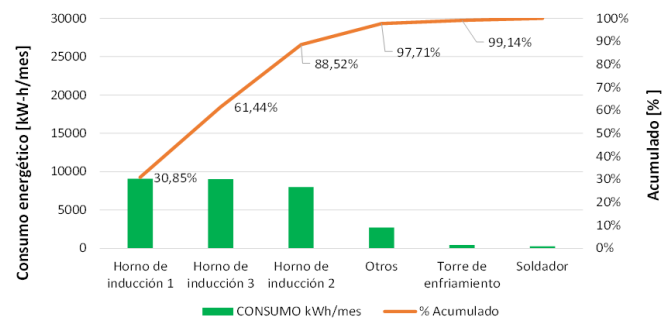


Fig. 5. Diagrama de Pareto para la energía eléctrica

Como se puede observar en este diagrama, los tres hornos de inducción consumen alrededor del 88.52% de la energía eléctrica total empleada en la compañía, aproximadamente 26125 kWh/mes, por lo que es posible afirmar que el uso significativo de la energía (USE) para la empresa intervenida se encuentra representado por los hornos de inducción eléctrica. Por esta razón, los esfuerzos realizados a lo largo de la intervención fueron muy enfáticos en estos tres elementos del proceso. En la Fig. 5 la barra de otros se refiere a la suma de los consumos energéticos de equipos que no tienen un consumo específico significativo dentro de la organización. Dentro de este grupo se encuentran los tornos, mandriles, fresadoras, compresores, entre otros.

El análisis energético de los USE se realizó en el periodo junio del 2018 hasta marzo del 2019, debido a que el consumo de energía varía de acuerdo al tipo de material y tipo de pieza a

fabricar, se aplicó el método de la producción equivalente eligiendo como variable de referencia al material con el índice de consumo más elevado, [6], [13]. Entonces:

$$Prod. equiv = \sum_{x=1}^X P_x \left( \frac{\overline{IC}_x}{\overline{IC}_m} \right) \quad (1)$$

Donde:

$P_x$  = Cantidad de un material X.

$\overline{IC}_x$  = Índice de consumo promedio de un material X.

$\overline{IC}_m$  = Índice de consumo promedio del material de mayor consumo específico.

En el intervalo de tiempo analizado se fundieron 23 tipos de materiales ferrosos y no ferrosos, los cuales fueron considerados para estructurar la producción equivalente. La Fig. 6 presenta el consumo de energía en proceso y producción equivalente en el tiempo, en esta es posible observar el comportamiento de los datos a lo largo del periodo base establecido y la relación entre las dos variables, haciendo que sea posible la identificación de las fechas en donde existieron comportamientos anómalos, dando así un punto de partida para poder indagar sobre el suceso e identificar posibles mejoras. Esta actividad forma la base para la posterior determinación del potencial global de ahorro debido a la variabilidad operacional y de mantenimiento, la planeación de la producción y la mejora de la capacidad técnica-organizativa de la empresa [17].

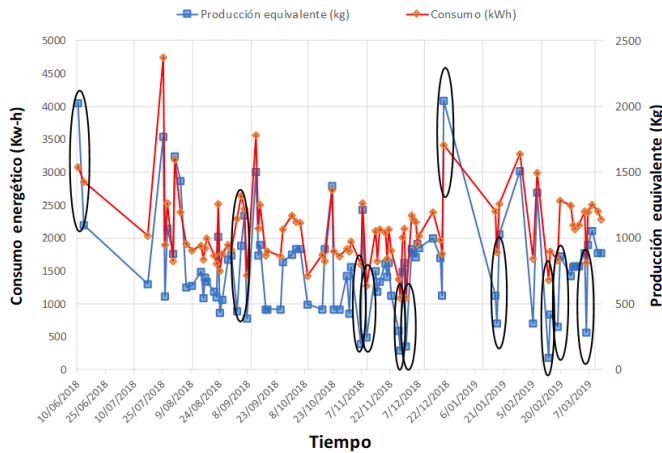


Fig. 6. Diagrama Energía-Producción vs Tiempo

Los puntos anómalos son los marcados con óvalos amarillos, los datos expuestos en este gráfico son considerados anormales cuando para una misma fecha del periodo se presentan intersecciones entre las líneas representativas de cada variable, puntos muy alejados uno del otro o puntos con tendencia inversa. Estos gráficos pueden interpretarse dependiendo de cuál se presente, como un alza en el consumo para un valor muy bajo de producción, una producción muy elevada para un consumo energético muy bajo o que es posible el hecho de que exista entre las variables una tendencia inversa, lo cual no tendría sentido para dos variables proporcionales.

Para verificar el comportamiento de las variables, pero ahora de manera individual, se establecieron los diagramas de control para cada grupo de datos, la producción equivalente y el consumo de energía. Este procedimiento se basa en delimitar

los valores arrojados en cada fecha en un rango conformado por dos límites que permiten verificar si dichos datos tienen un comportamiento considerado normal. Para establecer los límites, es necesario determinar la desviación estándar ( $\sigma$ ), que expresa una medida de dispersión de las variables con respecto a la media o mediana ( $\mu$ ) [18].

En cuanto a los puntos que se encuentran por fuera de los límites establecidos, es posible afirmar que tienen una pauta de distribución anormal, lo que se traduce en un comportamiento inestable de la variable analizada. Generalmente, la causa que provoca la anomalía debe ser investigada y eliminada para poder lograr la estabilización del proceso. A continuación, en las figuras 7 y 8 se presentan los gráficos de control para las variables de consumo energético y producción equivalente respectivamente, en este caso se tienen límites de control establecido a dos veces la desviación estándar de la media muestral.

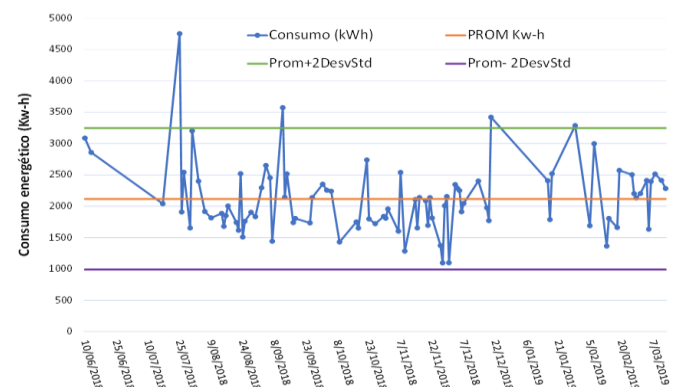


Fig. 7. Gráfico de Control Energía ( $\mu \pm 2\sigma$ )

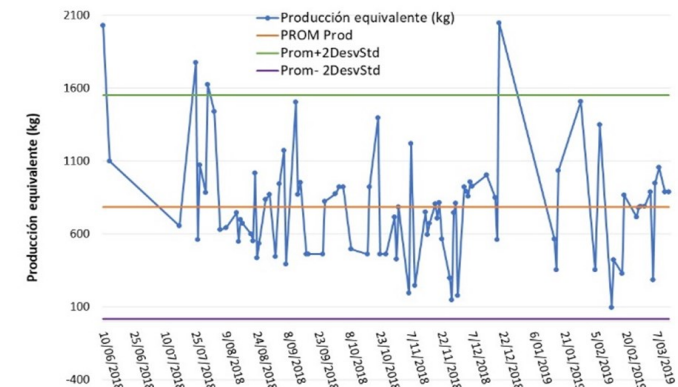


Fig. 8. Gráfico de Control Producción ( $\mu \pm 2\sigma$ )

Es claro que a pesar de que el día 25 de julio de 2018, la variable de consumo energético se encontraba por fuera de los límites de control, el comportamiento entre esta y la producción equivalente puede ser considerado congruente, ya que dicho consumo energético es proporcional al volumen de producción de la fecha, a diferencia del día 20 de diciembre de 2018, en donde la producción también supera el límite de control establecido pero el consumo asociado a esa fecha no lo hace.

También puede verse algunas situaciones atípicas, como la salida de los límites de control del valor de la producción equivalente al día 10 de junio de 2018, en donde adicionalmente se presenta una intersección de las curvas, evidenciable en



diagrama ilustrado en la Fig. 6.

El resto de puntos que se encuentran fuera de control con los límites establecidos en las figuras 7 y 8, cuentan con el mismo comportamiento descrito para los datos de producción y consumo del día 25 de julio de 2018, es decir, son congruentes entre ellos mismos. Este comportamiento es típico de procesos productivos que planifican su producción bajo pedidos de los clientes.

Para finalizar el proceso de revisión energética, se llevó a cabo la identificación de los aspectos que influyen en el consumo de energía en los USE. Esto se logró haciendo una minuciosa recolección y análisis de información de los registros de producción y consumo de energía, así como de los métodos operacionales de estos equipos y su respectiva comparación con recomendaciones de fabricante y catálogos de estos.

Debido a que el desempeño energético de los hornos de fundición por inducción depende principalmente de la implementación de buenas prácticas operativas en el proceso [10], [19], [20], el equipo de trabajo identificó los aspectos que más presentan variación operacional, y, por ende, variaciones en consumos de energía para producciones equivalentes similares. Estos aspectos son:

- Preparación y carga del metal
- Precalentamiento del crisol y la materia prima
- Potencia de trabajo
- Tiempo de colada y punto de vertido

De estos aspectos, el precalentamiento del crisol y la materia prima son completamente inexcusables, ya que se realizan para evitar humedad que pueda evaporar súbitamente y comprometer la seguridad de los operarios [21]. Sin embargo, los tiempos de precalentamiento deben ser ajustados.

En cuanto a la preparación y carga del metal se debe considerar que es fuertemente dependiente de la tecnología existente y de la operación del sistema. También se observa que mantener la fundición a máxima potencia, durante todo el proceso, para obtener mejor desempeño energético, depende de los operarios y de un mantenimiento adecuado en los sistemas de refrigeración de los hornos. En cuanto al tiempo de colada y el punto de vertido del material, se pudo establecer que dependen única-mente del concepto del operario, esta práctica es muy perjudicial para el desempeño energético, ya que un sobrecalentamiento de 50°C puede incrementar el consumo específico del horno hasta en 25 kWh por tonelada [19].

### C. Evaluación del Desempeño Energético

Un indicador de desempeño energético (IDEn), según la Norma ISO 50001, es la medida o unidad para medir el desempeño energético, mientras que la línea de base energética (LBEn) la define como una referencia cuantitativa que proporciona la base para la comparación del desempeño energético, siendo fundamentada en datos de un periodo de tiempo especificado.

La LBEn se elaboró considerando las siguientes premisas, según lo recomendado en [7], [13]:

- La línea base se elaboró en base a un modelo de regresión.

- Los datos para elaborar el modelo de la línea base fueron datos representativos de los ciclos operacionales de nueve meses de operación.
- Las condiciones de trabajo del periodo de toma de datos fueron los mismos: mismo equipamiento, iguales procedimientos operacionales, horas de trabajo etc.
- La variable dependiente del modelo fue siempre la energía consumida.
- Las variables independientes del modelo fueron las variables significativas que no dependen de la operación o del mantenimiento.
- Se consideró que las variables usadas para elaborar el modelo son significativas para el consumo de energía. Para ello se usó el método p-value con  $p < 0,05$

Definido el periodo base, se estableció la muestra inicial mínima de datos con la siguiente ecuación:

$$n_0 = \frac{Z^2 * C_v^2}{e^2} \quad (2)$$

Donde:

$Z$  = Valor de distribución normal estándar.

$C_v$  = Coeficiente de varianza.

$e$  = Nivel deseado de precisión.

Con referencia a la variable significativa desarrollada en este trabajo, se pudo constatar que esta cumple con la condición de P-Value, siendo de  $7,5 \times 10^{-8} < 0.05$ . Después de la verificación de la variable significativa, se corroboró el coeficiente de varianza y el coeficiente de determinación  $R^2$ , además de hacer un filtrado sistemático de datos, basado en gráficos de control y sin ir más allá de la muestra mínima permitida. La Fig. 9 presenta la línea de base energética y la línea meta para la producción equivalente.

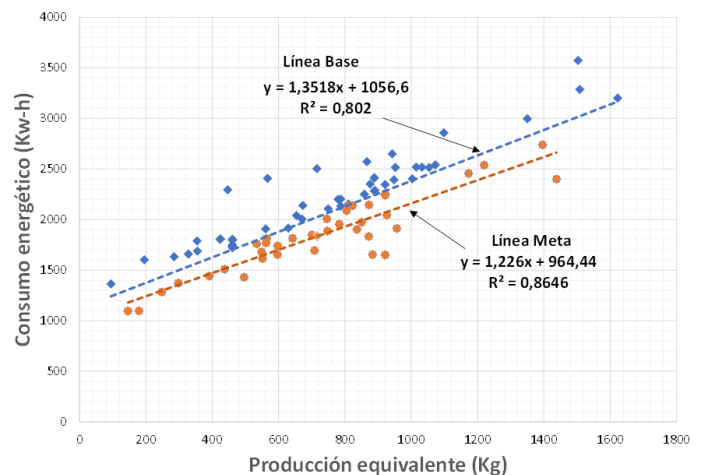


Fig. 9. Gráfico de Línea base y Línea meta

La línea base y la línea meta son representadas por rectas de la forma  $E = mP + E_0$ , donde  $E$  es la energía teórica consumida,  $m$  es una constante que depende directamente de la tecnología y  $E_0$  es una energía que no está asociada a la producción, esta última considera los consumos fijos de energía y los desperdicios energéticos en operación (mantenimiento y operación).

En esta figura las líneas azul y naranja representan la LBen y la línea meta respectivamente. Los intercepto de estas líneas con el eje vertical se pueden interpretar como la energía no asociada a la producción. La línea meta es resultado de una regresión lineal con los puntos de mejor desempeño energético (puntos por debajo de la LBen). Se observa que, para niveles de producción equivalente similares, se presenta una variabilidad en los consumos de energía, esto puede asociarse, generalmente, a condiciones operacionales intrínsecas en un proceso productivo, tales como temperatura, medio ambiente, mantenimiento, materia prima e incluso al factor humano [20].

Es posible determinar los potenciales de ahorro energético restando, de la LBen, la línea meta, esto se presenta en la ecuación (3). En esta ecuación  $P_n$  representa la producción por periodo.

$$Pot. de ahorro = \sum (0.125P_n + 92.16) \quad (3)$$

El potencial de ahorro para niveles de producción idénticos al periodo analizado es de 8.7% y se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1  
POTENCIAL DE AHORRO POR OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Energético (kWh)	15984.25
Económico (USD)	1486
Potencial de ahorro (%)	8.7

Ahora bien, los IDEn permiten evaluar de manera cuantitativa el desempeño energético, siendo fundamental para determinar la forma en que la energía está siendo utilizada, la cantidad de energía que es consumida en relación a determinada producción, además de la eficiencia en el uso de la energía para obtener un producto final.

La elaboración de IDEn consistentes con el proceso productivo, generalmente se fundamenta en la LBen, esto se corrobora en los IDEn que a continuación se muestran.

Un importante indicador instituido en este trabajo es el índice de consumo (IC), mediante el cual es posible establecer el potencial de ahorro energético por gestión de la producción. Este es obtenido a partir de dividir la LBen entre la producción, matemáticamente:

$$IC = \frac{mP + E_0}{P} \quad (4)$$

La importancia de este indicador radica en que relaciona los consumos de energía con la intensidad de producción. Una intensidad de producción alta “disuelve” la energía no asociada a la producción, incluidas las malas prácticas de operación y mantenimiento, mientras una baja intensidad de producción concentra dicha energía no asociada a la producción con las pocas unidades producidas, perjudicando el indicador sin que necesariamente se esté operando mal. El IC para los tres hornos de inducción para el periodo de junio del 2018 y marzo del 2019, se muestra en la Figura 10. Al igual que con la LBen, los puntos por debajo de la curva son de buena operación. El 13 de febrero del 2019, se registró el valor con mayor IC, con tan sólo 94.57 kg de producción y un consumo de 1363.72 kWh.

Evidentemente una planificación adecuada de la producción implica un mejor desempeño energético. El conocimiento de una producción crítica, donde el aumento de la producción no

afecte significativamente el IC, es fundamental para tal planificación. Este valor es determinado con la suma acumulativa de la variación del índice de consumo teórico (ICt) respecto a la variación de la producción, siendo el ICt calculado con la ecuación de la LBen y los valores de producción reales.

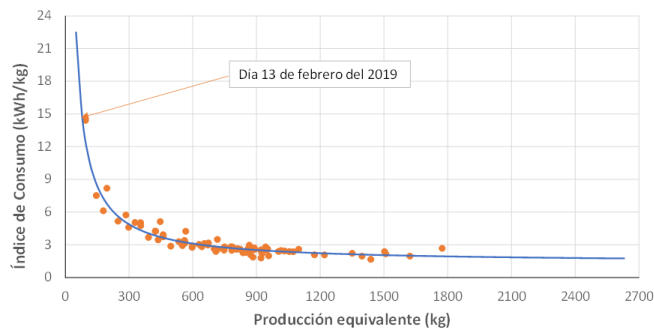


Fig. 10. Índice de consumo contra producción equivalente

El valor de producción crítica para los hornos de inducción es de 960 Kg como se observa en la Fig. 11. Producciones por encima de este valor no tienen efecto significativo en el índice de consumo, pero valores menores lo afectan en gran medida.

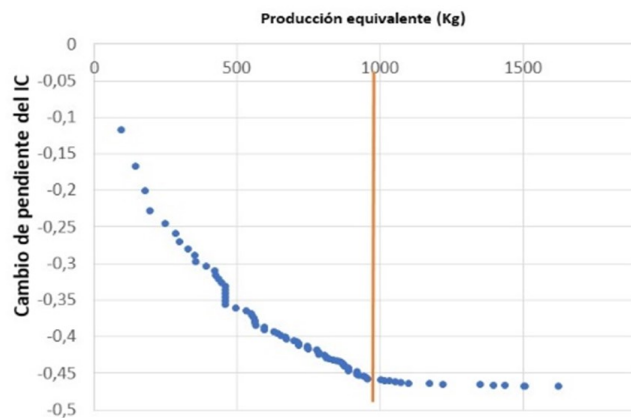


Fig. 11. Tasa crítica de producción

Otro indicador establecido en este trabajo es la Sumas Acumuladas (CUSUM siglas de Cumulative Sum), el cual representa la acumulación de las desviaciones de cada valor en comparación a un valor de referencia, permitiendo el monitoreo de desempeños energéticos actuales respecto a un periodo base o de referencia.

En el proyecto desarrollado, el periodo base es desde junio del 2018 hasta marzo del 2019, inmediatamente a este periodo se inicia la implementación de medidas de ahorro en la empresa, haciendo el monitoreo de la efectividad de estas en los meses de abril y mayo del 2019. La Fig. 12 muestra el CUSUM en el periodo de seguimiento a las medidas de ahorro.

La interpretación del CUSUM es realizada de acuerdo a la ubicación de los datos, si están por encima de cero, quiere decir que en el periodo analizado se presenta un sobreconsumo en referencia al periodo base, caso contrario implica un ahorro en el consumo de energía. En la Fig. 12 todos los datos están por debajo de cero, esto indica una disminución paulatina del consumo de energía en el periodo analizado. La acción que más impacto en el desempeño energético del periodo de control fue

el establecimiento del número mínimo de coladas por día (2/día, cuando hay fundición), obteniendo un ahorro de energía relacionado con el precalentamiento de los hornos de inducción.

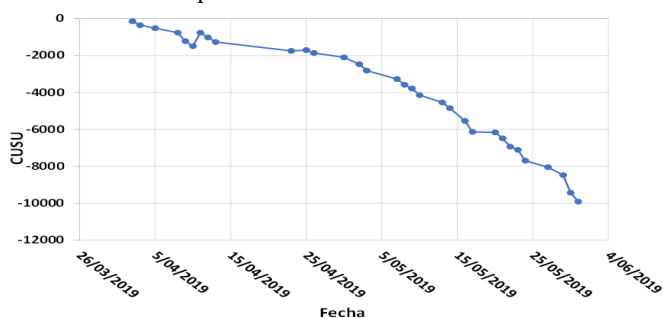


Fig. 12. CUSUM abril-mayo de 2019

Otras medidas que pueden tener un impacto significativo en el desempeño energético de los hornos de inducción se explican a continuación.

#### D. Medidas de Operación y Mantenimiento

La primera medida se basa en el sistema de refrigeración y la potencia de trabajo de los hornos de inducción, dado esto al deterioro en estos sistemas. La torre de enfriamiento no cuenta con un plan regular de mantenimiento, por lo que tanto la tubería de cobre dentro del intercambiador de calor, como la de retorno y suministro, presentan un alto grado de corrosión, además las aletas de aluminio encargadas de facilitar la transferencia de calor se encuentran muy deterioradas como se muestra en la Fig. 13.



Fig. 13. Estado torre de enfriamiento hornos de inducción

Estas situaciones hacen que, para metales ferrosos, sea imposible alcanzar las temperaturas necesarias para que los equipos trabajen a máxima potencia. Los hornos de inducción están diseñados para trabajar a 300 kW, sin embargo, por estas limitaciones, la potencia máxima de trabajo es de 200 kW, trayendo como consecuencia que solo se trabaje al 67% de su carga nominal.

Este modelo de operación contradice, en gran medida, las recomendaciones que presentan los manuales de buenas prácticas relacionadas a la fundición en equipos de inducción eléctrica, ya que explícitamente se indica que la razón por la cual los hornos de inducción eléctrica de frecuencia media (150 – 10000 Hz) se consideran equipos de alta eficiencia, es debido a su capacidad de alcanzar una elevada densidad de potencia, lo cual se traduce en un proceso de calentamiento más rápido y, por lo tanto, en períodos de fundición más cortos que, a su vez, incurren en la disminución de las pérdidas de calor asociadas al proceso. Consecuentemente, es notable que este tipo de hornos

opera con mayor eficiencia en cortos períodos de tiempo y altas potencias de suministro [22].

A partir de este planteamiento es posible establecer dos factores que potencian el problema del sistema de refrigeración mencionado y que justifican la toma de acciones correctivas que conlleven a su pronta resolución. El primero es que la eficiencia de los equipos de inducción eléctrica está directamente relacionada con la frecuencia de trabajo y, por lo tanto, a la potencia suministrada hacia la bobina inductora. El segundo, es el aumento de los tiempos de fundición, que se traduce en el incremento de las pérdidas energéticas por disipación de calor al ambiente, sin incluir los tiempos operacionales perdidos.

En cuanto al primer caso, la relación entre la frecuencia y la eficiencia de los equipos hace que trabajar a carga parcial disminuya la cantidad de energía aprovechada, esta relación se evidencia en la Fig. 14.

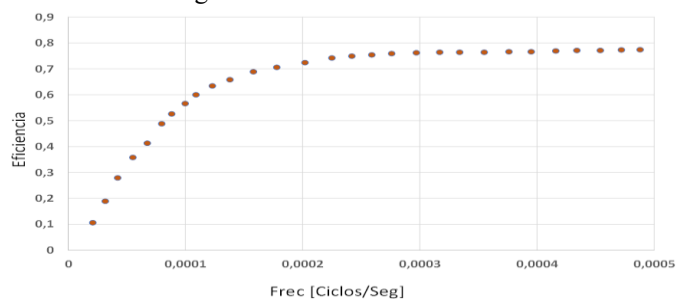


Fig. 14. Relación entre eficiencia y frecuencia para una carga dentro de un inductor [20].

En el gráfico se observa la variación de la eficiencia en una bobina de un horno en función de la frecuencia de trabajo, además de cómo, para una pieza de metal de cierto tamaño y resistividad puesta en el interior de dicha bobina inductora, existe una frecuencia que dicta un lento crecimiento de la eficiencia hacia valores con un comportamiento asintótico y uno a partir del cual, se nota un acelerado decrecimiento de la misma [23]. Otra publicación [24], aborda la dependencia que posee el desempeño energético respecto a la potencia de entrada, en él se evidencia que el consumo eléctrico incrementa exponencialmente con la disminución de la densidad de potencia. El segundo caso capaz de influir sobre el desempeño energético es el relacionado con una mayor cantidad de pérdidas energéticas por transferencia de calor, las cuales serán desproporcionalmente altas cuando la potencia suministrada sea muy baja [24].

De esta manera es posible denotar la relevancia del problema que evidencia el sistema de refrigeración de los equipos de inducción eléctrica. Además de la influencia que estos tienen sobre el desempeño energético actual de la empresa por el principal USEn.

En la Fig. 15 se presenta un gráfico de la variación del tiempo de fusión del acero respecto al aumento de la energía suministrada en los hornos, esto con el objetivo de comparar el comportamiento operacional actual de los equipos de inducción de la compañía con su índice nominal.

El índice nominal, puntos azules, es de 600 kWh/tiempo, mientras el establecido a partir del promedio de datos históricos de la operación de hornos, puntos rojos, fue de 950 kWh/tiempo. Esto muestra las diferencias de tiempo, para

iguales potencias, que lleva los procesos de fundición en la planta, siendo la falta de mantenimiento el principal foco de esta diferencia. Autores como [25] afirman que, a pesar de tener algún grado de dificultad, no debería tomar mucho más tiempo del nominal para que un horno de inducción haga que el metal alcance los 1500 °C.

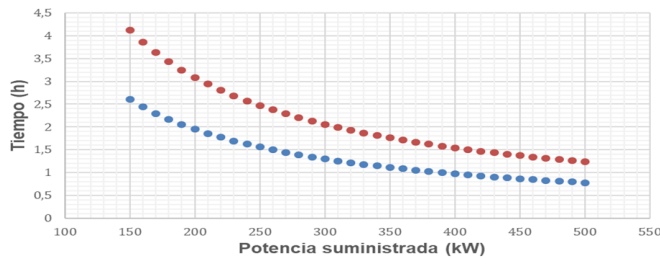


Fig. 15. Tiempo de fusión del acero respecto a la potencia suministrada

Existen dos razones que dan relevancia a la Fig. 15, la primera es que se puede observar el significativo incremento en el tiempo de fundición a medida que la potencia de trabajo disminuye, aumentando en la cantidad específica de pérdidas energéticas en forma de calor radiado. La segunda, lo distante que se encuentra el modelo operacional actual del nominal, es decir que, para una potencia de trabajo de 200 kW, que representa la máxima utilizable actualmente, es posible obtener un ahorro económico solo con la disminución del tiempo de fusión alcanzado por el modelo operacional nominal. Esto es:

$$\begin{aligned}
 & \text{Potencia de trabajo} = 200 \text{ kW} \\
 & \text{Tiempo índice nominal} = 1,95 \text{ h} \\
 & \text{Tiempo índice real} = 3,08 \text{ h} \\
 & \text{Ahorro en tiempo} = 1,14 \text{ h} \\
 & \text{Ahorro energético por colada} = 227,5 \text{ kWh/Col}
 \end{aligned}$$

Considerando que, por año se realizan aproximadamente 72 coladas de acero u otro metal ferroso (cuyo consumo específico es similar), y que el costo de la energía eléctrica en la compañía ronda los 0.092 USD/kWh, se obtiene que:

$$\begin{aligned}
 \text{Ahorro Anual} &= (227,5 \text{ kWh/Col})(72 \text{ Col/Año})(0,092 \text{ USD/kWh}) \\
 \text{Ahorro Anual} &= 1500 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

Evidentemente existe la necesidad de una evaluación de medidas que logren la capacidad de enfriamiento requerida por los hornos para que estos puedan operar a su potencia nominal.

Ahora bien, la correcta planificación de los procedimientos relacionados con la preparación del material a utilizar en los hornos de inducción representa una disminución considerable en las pérdidas de calor, que a su vez afectan la energía eléctrica requerida para el cambio de fase del metal. La disminución de escoria formada en el proceso, implica una reducción en las pérdidas energéticas, por cada 1% de escoria formada a partir de estos contaminantes a 1500 °C se pierden 10 kWh por tonelada de material [19].

Posterior a la selección de la chatarra óptima para el proceso de fundición que ejerce habitualmente la compañía, se propuso un plan de limpieza del material seleccionado, en el cual se ejecute un proceso de remoción de suciedad, arena, aceite, incrustaciones y demás impurezas que interfieran con la

adecuada fusión del metal. Si se omite el proceso adecuado de limpieza, se ve afectada la calidad del metal producido, la tasa de producción, el volumen de escoria producida, el consumo de energía, la vida del revestimiento refractario y la seguridad de la planta y el personal [19].

La forma de la chatarra también influye en el funcionamiento del equipo, es necesario evitar superficies filosas que puedan afectar el refractario del horno. Las dimensiones de la chatarra no deben ser muy grandes, debido a que, en el momento de introducirla al horno, pueden quedar espacios vacíos, lo que ocasiona gasto de energía innecesaria. Se recomienda llevar a cabo un análisis de las dimensiones o la forma de la chatarra, lo cual favorece a la conservación del refractario, a la prevención de problemas de puenteo y a la disminución de la cantidad de aire entre las piezas de la carga, aumentando la densidad de potencia transmitida, la conducción de calor y, por lo tanto, disminuye el tiempo de colada y el consumo energético [20]. Optimizando el tamaño de la materia prima, evitando entradas oxidadas y sucias, y usando carburadores más limpios, puede reducir el tiempo de fusión, teniendo en cuenta que 10 minutos adicionales pueden representar 100 kWh/ton de más [24].

El consumo de energía en uno de los tres hornos de inducción (horno de referencia), para una carga de 650 kg, es de 660 kWh, si la chatarra es oxidada; mientras que el consumo de energía para el mismo horno e igual carga es de 546 kWh si la carga es limpiada. De esta forma se puede estimar el ahorro de energía involucrado en el proceso de limpieza de la chatarra. Teniendo en cuenta que se realizan en promedio 72 coladas al año para este horno.

$$\text{Ahorro energético por colada} = 114 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro Anual} = (114 \text{ kWh/Col})(72 \text{ Col/Año})(0,092 \text{ USD/kWh})$$

$$\text{Ahorro Anual, horno grande} = 755.13 \text{ UDS}$$

Existe un valor de ahorro por mantenimiento y operación mayor al obtenido por la diferencia de la línea base y la línea meta, esto se debe a que en el periodo analizado no se realizó un mantenimiento que corrigiera los aspectos sugeridos anteriormente.

#### E. Medidas de Cambio Tecnológico

Otro aspecto a considerar es las pérdidas energéticas asociadas a la transferencia de calor entre el metal líquido y el ambiente. Es sabido que todos los cuerpos, con temperaturas superiores a 0 absoluto, irradian energía en forma de calor, la cual es emitida con una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del mismo [26], por lo tanto, es innegable que el metal fundido a más de 1000 °C dentro de los hornos de inducción, representen un foco de radiación significativo, según [27] un metal a 1500 °C (2730 °F) presenta una tasa de energía disipada por radiación de aproximadamente 1890 kW/m<sup>2</sup>, la cual se traduce en un importante gasto a medida que el tiempo de fundición se incrementa. La instalación de barreras de radiación en la boca de los hornos es una buena opción para disminuir esta pérdida [25].



La Figura 16 muestra un gráfico que resalta la importancia de contar con una barrera de radiación en equipos de fundición por inducción eléctrica. Se observa que, para la capacidad de los hornos de la empresa, la diferencia en tener o no barrera de radiación alcanza valores cercanos a los 150 kW de pérdidas energéticas, lo cual sumado a los altos tiempos de fundición que se presentan actualmente, agrava el hecho del bajo desempeño que presenta la empresa.

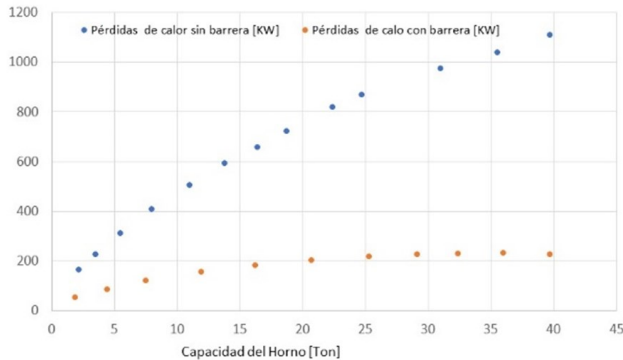


Fig. 16. Pérdidas por radiación en hornos con tapa abierta y cerrada [25].

Por lo tanto, colocar una barrera, conservando los tiempos y cantidades de operación, además de los precios del kWh planteados anteriormente, generaría un ahorro entorno a los 3000 USD/año en el horno de referencia. Esta medida de ahorro podrá ser considerada como una actividad de mantenimiento, sin embargo, los autores la valoran como cambio tecnológico porque su implementación generará un cambio súbito en la línea de base energética LBEn del proceso.

## V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un procedimiento que aplica herramientas de gestión energética para estimar los ahorros potenciales de una pequeña empresa de fundición de metales, en concordancia con la etapa de planificación energética de la norma ISO 50001:2018; procedimiento que fue aplicado a una empresa localizada en el Valle del Cauca, Colombia, en el marco de un programa nacional financiado por UNIDO y la UPME.

La implementación del proceso de revisión energética permitió establecer los usos significativos de la energía, por medio de mediciones y análisis del consumo de energía en las diferentes áreas de la compañía. Con este procedimiento se logró identificar que los equipos que representan mayor consumo de electricidad, son los hornos de inducción eléctrica, que representan el mayor consumo, alrededor del 85% del total de la energía eléctrica, donde se concentraron los estudios para establecer un incremento en el desempeño energético en la empresa intervenida.

En la evaluación energética de la empresa, se aplicaron varias herramientas estadísticas características de un sistema de gestión de la energía, determinándose el comportamiento del consumo energético en relación a la producción en un período base, identificando las variables atípicas, donde se encontró una explicación válida para este comportamiento. Asimismo, se filtraron los datos no representativos, lo que permitió obtener la representación más acertada del gráfico energía vs. producción

del período base. Se establecieron los potenciales de ahorro para los diferentes niveles de producción, lo cual representa un ahorro de 15984.25 kWh que corresponde al 8.7% de la energía total consumida en los 10 meses analizados, y un valor de 1486 USD.

Con el estado operativo actual de la compañía, fue posible establecer las oportunidades globales de mejora del desempeño energético, relacionadas directamente al proceso de fundición por inducción. Además, se establecieron indicadores de desempeño, para verificar el comportamiento de las variables en relación al consumo de energía y poder planificar la producción para que el proceso sea más eficiente.

Se realizaron diferentes propuestas referentes al área de fundición, las cuales representan gran influencia en el desempeño energético de la compañía. Se recomendó repotenciar el sistema de refrigeración de los hornos, para que sea posible incrementar la potencia de trabajo de los hornos, logrando una disminución en el tiempo de fusión (1,14 horas menos), lo que se traduce a un ahorro anual de 1500 USD. También se propuso un mecanismo capaz de reducir las pérdidas de energía por radiación, debido a la transferencia de calor del material hacia el ambiente. Adicionalmente, se propuso la optimización en las condiciones operativas, por medio de una mejor gestión en el proceso de selección de la materia prima, que representa un ahorro anual de 755.13 USD al aplicarse el proceso de limpieza de la chatarra introducida a los hornos que funden materiales ferrosos.

Como trabajo futuro se considera realizar la evaluación económica de las medidas de operación, mantenimiento y cambio tecnológico presentadas y la ejecución de las que presenten viabilidad económica. Asimismo la implementación de un sistema de control operacional con base a los IDEn propuestos y posteriormente la implementación total del sistema de gestión de energía en la empresa de fundición de acuerdo a los requerimientos de la norma ISO 50001:2018.

## REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2019*, IEA Publications, Printed in France - November 2019. Available: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [2] J. R. Gómez, E. C. Quispe, R. Castrillón, P. R. Viego, "Identification of Technoeconomic Opportunities with the Use of Premium Efficiency Motors as Alternative for Developing Countries," *Energies*, 2020, 13, 5411.
- [3] P. Donolo, C. M. Pezzani, A. S. Lifschitz, C. H. De Angelo, "Economic Barriers to the Application of Energy-Efficient Motors in Industry," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 100 no.1e, 2020.
- [4] A. J. Gonzalez, R. Castrillon, E. C. Quispe, "Energy efficiency improvement in the cement industry through energy management," in *Proc. IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*, San Antonio, TX, USA, 2012, 14-17 May 2012.
- [5] A. J. Gonzalez, R. Castrillon, E. C. Quispe, "Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía," *Dyna*, vol. 80, no. 177, pp. 115-123, 2013.
- [6] G. E. Valencia, Y. Cardenas, E. S. Ramos, A. Morales, J. C. Campos, "Energy saving in industrial process based on the equivalent production method to calculate energy performance indicators", *Chemical Engineering Transactions*, vol. 57, 2017, pp. 709-714.
- [7] R. Castrillon; E. C. Quispe; A. González; M. Urhan; D. Fandiño, *Metodología para la implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía: Fundamentos y casos prácticos*, Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente, Primera Reimpresión, Impreso en Colombia, 2016.

- [8] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), NTC-ISO 50001:2018, *Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*, Editada por el ICONTEC, febrero 2019.
- [9] O. Prias Caicedo and D. Montaña, "Modelo Estratégico de Innovación para impulsar la Gestión Energética en Colombia," *Energética*, vol. 44, pp. 61–68, Dec. 2014.
- [10] P. Thollander, S. Backlund, A. Trianni, E. Cagno, "Beyond barriers – A case study on driving forces for improved energy efficiency in the foundry industries in Finland, France, Germany, Italy, Poland, Spain, and Sweden," *Applied Energy*, 111 (2013) 636-643.
- [11] A. Trianni, E. Cagno, P. Thollander, S. Backlund, "Barriers to industrial energy efficiency in foundries: a European comparison," *Journal of Cleaner Production*, 40 (2013) 161-176.
- [12] A. Prashar, "Towards sustainable development in industrial small and Medium-sized Enterprises: An energy sustainability approach," *Journal of Cleaner Production*, 235 (2019) 977-996.
- [13] J. C. Campos, O. F. Prias, *Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía – Guía con Base en la Norma ISO 50001*. Programa Nacional SGIE. 2013. Disponible en: <http://recice.com/>
- [14] Z. Morvay, D. Gvozdenac, *Applied industrial energy and environmental management*. Great Britain, John Wiley & Son, Ltd, pp. 432, 2008.
- [15] J. C. Campos, O. F. Prias, E. C. Quispe, J. R. Vidal, E. Lora, "El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional", *El Hombre y la Máquina*, enero-junio 2008, No. 30, pp. 18-31.
- [16] "Sankey Flow Show," 2019. [Online]. Available: <https://www.sankeyflowshow.com/>.
- [17] International Energy Agency (IEA), *Energy Technology Perspectives 2015*, IEA Publications, Printed in France by Corlet, May 2015. Available: [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [18] W. Navidi, *Estadística para Ingenieros y Científicos*, Editorial McGraw-Hill/Interamericana, Impreso en Mexico, 2006.
- [19] TERI, COINDIA, *Energy Efficiency Best Operating Practices Guide for Foundries*, New Delhi, India, 2015.
- [20] UNIDO, GEF, BEE, "Promoting Energy Efficiency and Renewable A GEF-UNIDO-BEE Project Best Operating Practices Jamnagar Brass Cluster," New Delhi, India, 2017.
- [21] Inductotherm, *Safety for the Foundry Industry*, 2020. [Online]. Available: <https://inductotherm.com/safety/safety-for-melting-in-the-foundry-industry/>.
- [22] ENERGY STAR, "Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting Casting," An Energy Star Guide for Energy & Plant Managers, U.S. Environmental Protection Agency, 2016, p. 124.
- [23] M. J. Marchbanks, "The Steel-Melting Coreless Induction Furnace," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 73, Issue 443, November 1933, pp. 509 – 519
- [24] W. Schmitz, D. Trauzeddel, "The Melting, Holding and Pouring Process-Energy and Process-Related Aspects," *HOSSL Hermann Otto Suderow SL*. Available in : <http://www.hossl.com>
- [25] R. M. Lazzarin and M. Noro, "Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 509–520, November 2015.
- [26] Y. A. Cengel y A. J. Gahar Y., *Transferencia de calor y masa*, Cuarta Edición. Mc Graw-Hill Interamericana, 2011, 911 p.
- [27] U. S. Department of Energy, "Reduce Radiation Losses from Heating Equipment", in *Energy Tips - Process Heating*, January 2006. [Online]. Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/reduce\\_radiation\\_lossess.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/reduce_radiation_lossess.pdf)
- [28] J. Astigarraga y J. L. Aguirre, *Hornos Industriales de Inducción. Teoría calculo y aplicaciones*, McGraw-Hill Interamericana de España, 1994.



Colombia.

**Juan Diego Chaves** Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma de Occidente (Colombia). Ejecutor Programa de Evaluación Energética Industrial, financiado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) de



**María Isabel Gallego**, Ingeniera Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente (Colombia). Ejecutor Programa de Evaluación Energética Industrial PEVI, financiado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) de Colombia.



Occidente, Colombia.

**Félix González Pérez**, Ingeniero Termoenergético, Magister en Eficiencia Energética y Doctor en Termotecnia de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Investigador del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente CEEMA en Optimización de Sistemas Térmicos y Gestión Energética. Desde 2017 es profesor de la Universidad Autónoma de



**David Aguilar**, Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma de Occidente (Colombia). Ejecutor Programa de Evaluación Energética Industrial PEVI, financiado por la ONUDI y la UPME de Colombia.



en las líneas de Gestión y Eficiencia Energética y Energías Renovables. Director Programa de Evaluación Energética Industrial PEVI, actualmente es profesor titular en la Universidad Autónoma de Occidente y director de la Especialización en Eficiencia Energética de la misma universidad.

**Juan Ricardo Vidal**, Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Pereira. Especialista en Eficiencia Energética en la Universidad Autónoma de Occidente. Magister en Eficiencia Energética de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. Doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Itajubá, Brasil. Investigador del Grupo de Investigación en Energías GIEN



**Enrique Ciro Quispe** (M'95-SM'12) Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Magister en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle. Actualmente es Profesor Titular del Departamento de Energética y Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente y Director del

Grupo de Investigación en Energías, GIEN. Presidente del Comité Técnico 131 Máquinas Eléctricas Rotatorias y miembro del Comité Técnico 228 Gestión Energética del ICONTEC. Investigador Asociado del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia. Experto Internacional UNIDO en Eficiencia Energética Industrial. Áreas de docencia e investigación: máquinas y accionamientos eléctricos, calidad de la energía eléctrica, gestión y eficiencia energética.